

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO

Diego Dajori dos Santos (1), Daiane dos Santos da Silva Godinho (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
diegodajori@hotmail.com (1) dss.engcivil@gmail.com (2)

RESUMO

No projeto e controle de qualidade do concreto, a Resistência à Compressão Axial é uma propriedade frequentemente especificada, tanto pela facilidade de execução e baixo custo quanto pela importância na segurança da estrutura. A NBR 6118:2014 apresenta equações que estimam a resistência do concreto ao longo do tempo e uma série de expressões para obter resultados estimados de Módulo de Elasticidade e Resistência à Tração por Compressão Diametral em função da Resistência à Compressão Axial. No presente trabalho foi realizada uma análise das propriedades do concreto com os ensaios de Resistência à Compressão Axial, Módulo de Elasticidade, Tração por Compressão Diametral e Difração por Raios-X, nas idades de 3, 7, 28, 90 e 150 dias. Utilizou-se os cimentos CP V ARI e CP II F - 32, dosados para atingir resistência de 30 e 50 MPa. A partir dos resultados obtidos elaboraram-se gráficos com curvas de correlação avaliando a variação das resistências em função das idades. Os objetivos principais foram estudar a diferença do aumento da resistência inicial, e o crescimento desta resistência a partir dos 28 dias e contribuir com dados de referência para o meio técnico. O trabalho comprovou o ganho rápido de resistência no cimento CP V ARI nas primeiras idades, e demonstrou o aumento significativo nos dois tipos de cimentos aos 90 e 150 dias, sendo este um aumento que pode ser estudado para trabalhar em favor da segurança e economia em projetos para edificação.

Palavras-chave: Concreto, propriedades mecânicas, idade.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, é aplicado de diversas formas, nas rodovias, edifícios, usinas hidrelétricas. Obtido por meio da mistura adequada de cimento, agregado fino, agregado graúdo e água, e em algumas situações são incorporados produtos químicos, com a finalidade de melhorar algumas propriedades, como aumentar a trabalhabilidade e a resistência e retardar a velocidade das reações químicas que ocorrem explica Carvalho e Figueiredo Filho (2014).

O concreto destaca-se por ser um material de grande Resistência à Compressão Axial e no estado fresco possibilita ser moldado de várias formas e tamanhos. Segundo NEVILLE (1997), considera-se que a resistência de um concreto, curado em água a uma temperatura estabelecida, depende de apenas dois fatores: a relação água/cimento e o grau de adensamento.

As diversas características que o concreto endurecido deve apresentar para que possa ser utilizado dependem fundamentalmente do planejamento e dos cuidados na sua execução. O planejamento consiste em definir as propriedades desejadas do concreto, analisar e escolher os materiais existentes ou disponíveis e estabelecer uma metodologia para definir o traço (proporção entre os componentes), equipamentos para a mistura, o transporte, adensamento e cura (FIGUEREDO, 2014, p.29).

Uma estrutura de concreto deve ser projetada de tal forma que, sob condições ambientais esperadas, ela mantenha sua segurança, funcionalidade e aparência aceitável durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem elevado custos de manutenção (ISAIA, 2005).

O ganho de resistência do concreto ocorre pela hidratação do cimento em contato com a água da mistura. A hidratação do cimento caracteriza-se pela sequência de reações químicas entre os compostos sólidos e a água, levando a reação de pega e o enrijecimento das misturas cimento-água.

Na presença de água, os silicatos e os aluminatos componentes do cimento, formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente (NEVILLE, 1997).

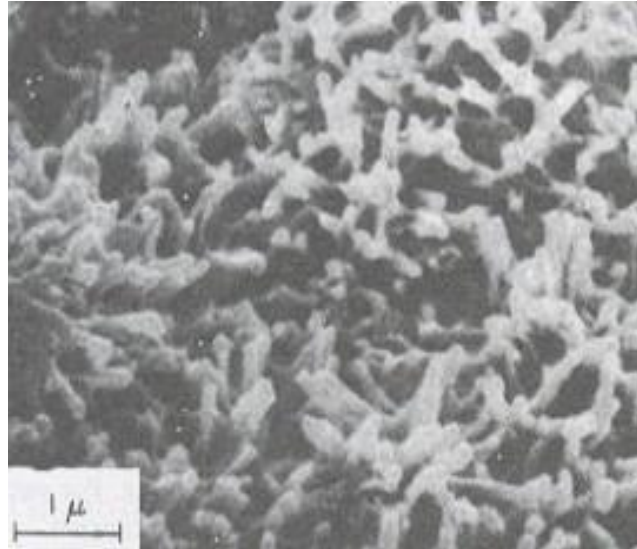
A hidratação dos aluminatos com a presença da gipsita forma uma capa de etringita que assumem formas de pequenas agulhas prismáticas e resultam em um enrijecimento imediato da pasta. A hidratação do C_3S (silicato tricálcico) e C_2S (silicato dicálcico), os quais são os principais compostos cimentícios do cimento, originam hidróxido de cálcio que possuem cristalinidades, morfologias e composições químicas muito variadas e são descritas por C-S-H (silicato cálcico hidratado), ao qual é responsável pela resistência atingida no cimento endurecido (NEVILLE, 2016).

As fases dos aluminatos e silicatos hidratados começam a criar algumas ligações interpartículas, que resultam no endurecimento progressivo da pasta de cimento. Após algumas horas de hidratação, os grãos de cimento são cobertos por uma camada de hidratos, a qual vai se tornando cada vez mais espessa e dificultando a

passagem das moléculas de água para chegarem às partes não hidratadas das partículas de cimento (AITCIN, 2000).

O C-S-H (silicato cálcico hidratado), conforme apresenta a Figura 01, representa 50 a 60% do volume dos sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada e é responsável pela resistência da pasta a esforços mecânicos. (MEHTA, MONTEIRO, 1994).

Figura 01: Cristais de C-S-H com três dias de idade.



Fonte: MEHTA E MONTEIRO, 1994.

No presente trabalho foi estudada a evolução das propriedades mecânicas do concreto, tais como Resistência a Compressão Axial, Módulo de Elasticidade e Tração por Compressão Diametral. Para isso, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm para as diferentes classes de agressividades indicadas pela norma NBR 6118:2014.

Os corpos-de-prova foram curados em água por 28 dias, sendo submetidos aos ensaios mecânicos de Resistência a Compressão Axial, Módulo de Elasticidade, Tração por Compressão Diametral e Difração por Raios-X, nas idades de 03, 07, 28, 90 e 150 dias.

Tendo posse dos resultados dos ensaios mecânicos, foram construídas curvas de correlação entre as propriedades mecânicas com a idade do concreto e comparado com as recomendações normativas e trabalhos técnicos já realizados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O experimento constitui-se na produção de um concreto convencional, no qual foram moldados 180 corpos-de-prova. Os corpos-de-prova foram divididos em quatro grupos, com resistência de 30 MPa e 50 MPa, utilizando o cimento Portland CP V-ARI e o cimento CP II F- 32. Como agregado graúdo foi utilizado à brita com dimensão máxima de 25 mm, e como agregado miúdo a areia natural média.

De acordo com a NBR 5733:1991, o cimento Portland de alta resistência inicial é denominado pela sigla CP V ARI. O mesmo apresenta um aumento rápido da resistência nas primeiras idades.

O uso do cimento Portland de alta resistência inicial é indicado quando se necessita de um aumento rápido da resistência, por exemplo, para aceleração de retirada de fôrmas, indústrias de artefatos, por essa razão é muito utilizado pela indústria de pré-moldados visando alcançar aumento de produtividade.

2.1.1 PROCEDIMENTO DE PRODUÇÃO DO CONCRETO

Os materiais utilizados para a produção do concreto foram separados nas suas quantidades indicadas na Tabela 01. Na betoneira foram adicionados os materiais de forma gradativa a quantidade determinada de brita, cimento, areia e água, até obter uma homogeneização do concreto.

Tabela 01 – Traços de concreto com cimentos CP II e CP V-ARI

| | RELAÇÃO AGUA/CIMENTO | CIMENTO | | AGREGADO MIÚDO | AGREGADO GRAÚDO |
|----------------------|-------------------------|---------|--------------|-------------------|--------------------|
| | | CP II | CP V- ARI | | |
| DOSAGEM 01 30 MPa | 0,61 | | 1 | 3,6 | 3,4 |
| DOSAGEM 02 50 MPa | 0,39 | 1 | | 1,8 | 1,2 |
| DOSAGEM 03 30 MPa | 0,61 | | 1 | 3,6 | 3,4 |
| DOSAGEM 04 50 MPa | 0,39 | 1 | | 1,8 | 1,2 |

Fonte: O autor, 2017.

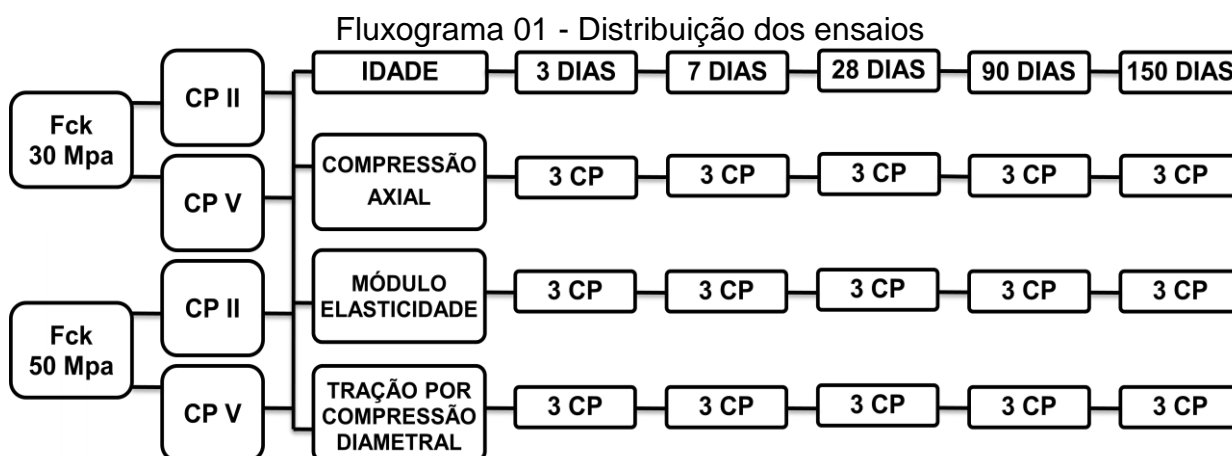
Os traços escolhidos correspondem a concretos com f_{ck} 30 MPa e 50 MPa, conforme dosagens preestabelecidas.

Depois de produzido o concreto na betoneira, foi retirada uma amostra de concreto, onde se procedeu com o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67:1998.

2.2 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 10 x 20 cm e moldados de acordo com a NBR 5738:2015. Os equipamentos utilizados foram 45 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm divididos em quatro grupos, totalizando 180 corpos-de-prova. Todos os moldes foram devidamente limpos e lubrificados com desmoldante a base de óleo na face interna para facilitar na desforma no dia seguinte.

Após 24 horas os corpos-de-prova foram desformados e armazenados em um tanque com água à temperatura ambiente. Os primeiros 36 corpos-de-prova ficaram por três dias no tanque, 36 permaneceram por sete dias, 36 ficaram 28 dias, 36 por 90 dias e os últimos 36 corpos-de-prova permaneceram por 150 dias submersos no tanque. Após cada período os corpos-de-prova foram retirados do tanque e armazenados em ambiente seco por aproximadamente duas horas, sendo submetidos aos ensaios posteriormente. O Fluxograma 01 apresenta a distribuição dos ensaios.



Fonte: O autor, 2017.

2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para determinar a Resistência à Compressão Axial dos corpos-de-prova utilizou-se a prensa servo-hidráulica da marca EMIC, modelo PC200i e foram adotados os procedimentos indicados pela NBR 5739:2007.

É o ensaio mais usado para o controle de resistência do concreto, pois é de fácil execução, custo acessível e de grande importância para a segurança das estruturas. No ensaio é aplicada uma força gradual sobre o corpo-de-prova, até que o mesmo venha a se romper. Os resultados ficam salvos nos dados do software do computador. O cálculo da Resistência a Compressão Axial é definida pela Equação 01.

Equação 01

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2}$$

Onde:

f_c = Resistência à Compressão (MPa);

F = Força máxima alcançada (N);

D = Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

A Figura 02 ilustra o modo de utilização da prensa no teste de Resistência à Compressão Axial.

Figura 02: Ensaio de Compressão Axial.



Fonte: O Autor (2017).

2.2.2 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Para a realização do ensaio, o corpo-de-prova de concreto cilíndrico foi submetido a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas, conforme mostra a Figura 03. A carga foi aplicada continuamente, sem choque, num crescimento constante dentro da faixa de Resistência à Tração por Compressão Diametral até a ruptura conforme recomendações da NBR 7222:2011. O objetivo desse ensaio foi fornecer o valor da Resistência à Tração por Compressão Diametral dos corpos-de-prova cilíndricos de concreto com medidas padronizadas com relação comprimento/diâmetro. A Resistência à Tração por Compressão Diametral pode ser calculada pela Equação 02.

Equação 02

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot L}$$

Onde:

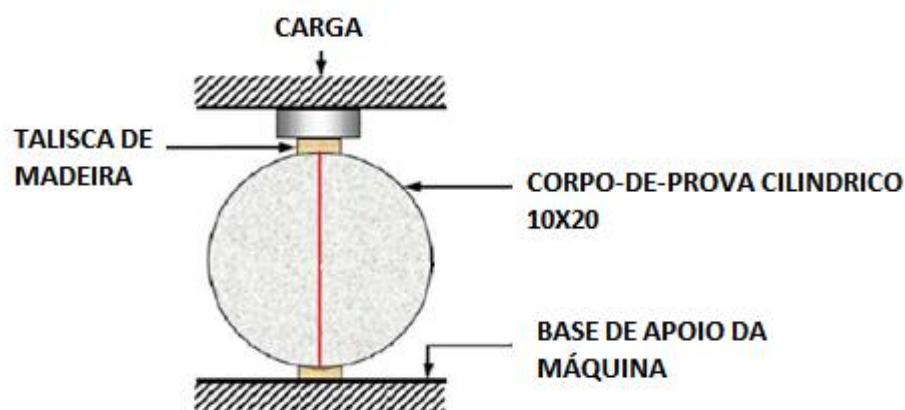
$f_{t,d}$ = Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

F = Carga máxima obtida no ensaio (N);

L = Comprimento do corpo-de-prova (mm);

D = Diâmetro do corpo-de-prova (mm).

Figura 03: Ensaio de Tração por Compressão Diametral



Fonte: O Autor (2017).

2.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O ensaio de Módulo de Elasticidade do concreto, conforme demonstra a Figura 04, foi realizado tendo como parâmetro a norma ABNT NBR 8522:2008.

O Módulo de Elasticidade é um parâmetro relativo à deformação do concreto sob a ação de tensões, sendo avaliado pelo diagrama de tensão x deformação no ensaio de compressão.

O objetivo do ensaio do Módulo de Elasticidade foi verificar a deformação do corpo de prova em relação à tensão aplicada. Para calcular o Módulo de Elasticidade, foi utilizada a Equação 03:

Equação 03

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} 10^{-3}$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, em MPa ($b=0,3f_c$);

σ_a é a tensão básica, em MPa ($a=0,5$ MPa);

ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

Figura 04: Ensaio Módulo de Elasticidade



Fonte: O Autor (2017).

2.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Para a realização do ensaio de Difração de Raios-X (DRX), foi necessário moer o corpo-de-prova com uma marreta e logo após utilizar o britador mandíbula do Laboratório de Cerâmica localizado no IDT/UNESC. Esse processo foi necessário para ser utilizado o moinho periquito, onde os grãos do corpo-de-prova ficaram moídos para passar na peneira de numero 200 (0,075 mm).

Cada amostra foi composta por 20 gramas de material, as quais foram ensaiadas no laboratório de caracterizações de materiais, com o ensaio de Difração de Raios-X, de acordo com a Figura 05. O objetivo foi identificar a formação de sólidos cristalinos em cada amostra e fazer uma análise quantitativa dos materiais através dos picos que aparecem no difratogramas.

Figura 05: Equipamento Shimadzu LabX XRD-6000



Fonte: O Autor (2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de Resistência à Compressão Axial, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Elasticidade e Difração por Raios-X. Os dados obtidos nesse projeto de pesquisa foram analisados por estatística descritiva e análise de variância (ANOVA), de forma que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95 %.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A variação da Resistência à Compressão Axial do concreto em relação a sua idade está apresentada na Tabela 02.

Tabela 02 – Resistência à Compressão Axial

| Tempo (dias) | CPV 30 MPa | Média | Desvio Padrão | CPV 50 MPa | Média | Desvio Padrão | CPII 30 MPa | Média | Desvio Padrão | CPII 50 MPa | Média | Desvio Padrão |
|--------------|------------|-------|---------------|------------|-------|---------------|-------------|-------|---------------|-------------|-------|---------------|
| 3 | 29,01 | | | 44,61 | | | 14,60 | | | 34,00 | | |
| | 28,61 | 28,87 | 0,23 | 40,38 | 42,84 | 2,20 | 15,20 | 14,97 | 0,32 | 34,10 | 33,97 | 0,15 |
| | 29,00 | | | 43,52 | | | 15,10 | | | 33,80 | | |
| 7 | 35,30 | | | 49,20 | | | 21,20 | | | 44,60 | | |
| | 35,10 | 35,17 | 0,12 | 51,30 | 50,50 | 1,14 | 22,50 | 21,77 | 0,67 | 46,90 | 45,93 | 1,19 |
| | 35,10 | | | 51,00 | | | 21,60 | | | 46,30 | | |
| 28 | 39,80 | | | 57,60 | | | 31,60 | | | 56,60 | | |
| | 39,40 | 39,33 | 0,50 | 55,80 | 56,30 | 1,14 | 30,00 | 30,67 | 0,83 | 51,40 | 54,43 | 2,71 |
| | 38,80 | | | 55,50 | | | 30,40 | | | 55,30 | | |
| 90 | 44,70 | | | 63,10 | | | 34,40 | | | 68,90 | | |
| | 44,50 | 44,40 | 0,36 | 60,90 | 63,13 | 2,25 | 36,80 | 36,53 | 2,01 | 65,60 | 66,70 | 1,91 |
| | 44,00 | | | 65,40 | | | 38,40 | | | 65,60 | | |
| 150 | 45,60 | | | 72,10 | | | 34,60 | | | 68,10 | | |
| | 45,10 | 45,27 | 0,29 | 66,10 | 68,13 | 3,44 | 35,60 | 35,63 | 1,05 | 67,80 | 67,80 | 0,30 |
| | 45,10 | | | 66,20 | | | 36,70 | | | 67,50 | | |

Fonte: O Autor, 2017.

Ao analisar os dados da Tabela 02 e realizar a ANOVA verificou-se diferença estatística em algumas idades por influência do tipo de cimento utilizado.

Na análise de variância entre o cimento CP V 50 MPa e CP II 50 MPa, não houve diferença significativa nas idades de 28, 90 e 150 dias e encontrou-se uma diferença estatística nas idades de 03 e 07 dias, em razão do cimento do CP V ter um alto ganho inicial, conforme demonstra a Tabela 03.

Tabela 03 – Percentual de Resistência à Compressão Axial

| Tempo (dias) | CPV 30 MPa % | CPV 50 MPa % | CPII 30 MPa % | CPII 50 MPa % |
|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 3 | 73,40 | 76,09 | 48,81 | 62,29 |
| 7 | 89,42 | 89,70 | 70,98 | 84,38 |
| 28 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 90 | 112,89 | 112,13 | 119,11 | 122,54 |
| 150 | 115,10 | 121,01 | 116,17 | 124,56 |

Fonte: O Autor, 2017.

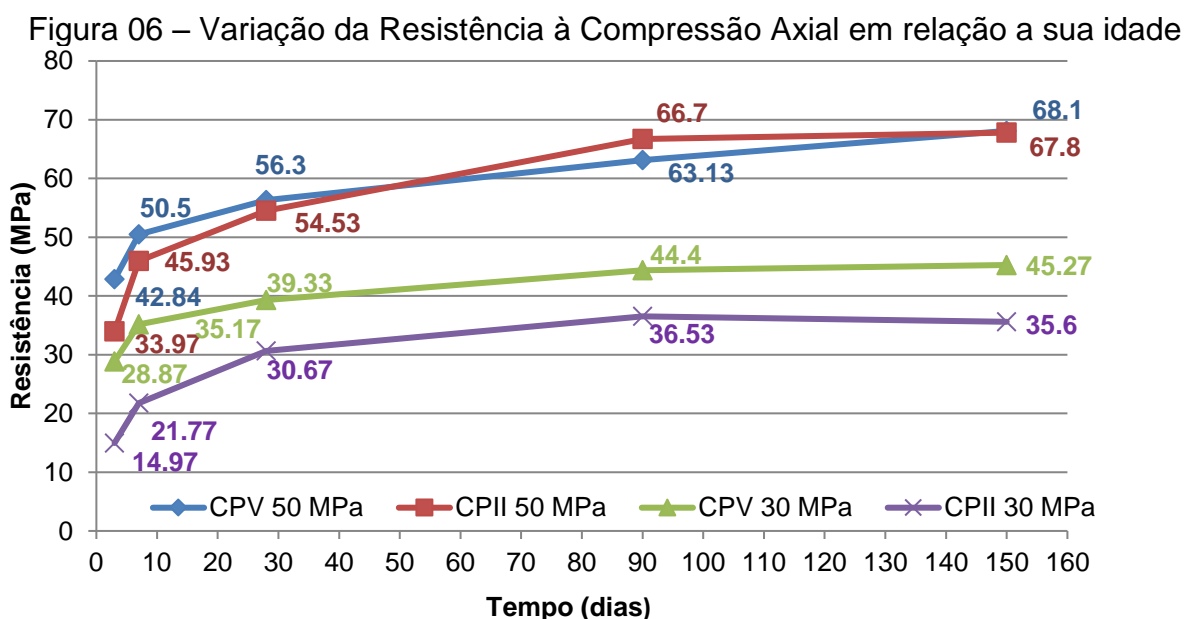
De acordo com a Tabela 03 verificou-se que com o uso do cimento CP V ARI foi possível em 03 dias atingir 70 % da Resistência à Compressão Axial em relação à resistência parâmetro de 28 dias.

A velocidade mais alta de endurecimento dos cimentos de alta resistência inicial é conseguida por um teor mais elevado de C_3S e pela moagem do clínquer em maiores finuras. Esse aumento rápido de resistência significa também um grande despreendimento de calor de hidratação (NEVILLE, 1982).

A partir dos 28 dias os dois tipos de concreto apresentaram um aumento da resistência relevante, porém o concreto com o cimento CP II apresentou aumento significativo em relação ao concreto com cimento CP V, conforme especificado abaixo.

O estudo demonstrou que nos 90 dias as amostras com cimento CP II, apresentaram um aumento de 20 % em relação à resistência parâmetro de 28 dias e uma média superior de 8 % em relação às amostras com cimento CP V nos 90 dias. Na idade de 150 dias, os concretos com cimentos CP II e CP V aumentaram respectivamente suas resistências em 24,56 % e 21 % em relação à idade parâmetro de 28 dias.

A evolução da resistência do concreto com o tempo depende de vários fatores, um deles é o tipo de cimento utilizado. Para os dois tipos de cimentos utilizados nesse estudo foi produzido um gráfico com linhas da resistência em função das idades, demonstrado na Figura 06.



Fonte: O Autor, 2017.

O conhecimento da relação resistência/tempo é importante quando a estrutura vai ser posta em serviço, ou seja, submetida ao carregamento pleno, em idades maiores. Nesse caso, o ganho da resistência após a idade de 28 dias pode ser levada em consideração no dimensionamento estrutural (NEVILLE, 2016).

Embora a prática convencional seja de especificar a resistência do concreto com base nos resultados aos 28 dias, há um movimento crescente para especificar a resistência aos 56 ou 90 dias, uma vez que vários elementos estruturais não estão totalmente carregados por períodos de dois ou três meses, ou até por mais tempo (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

Das propriedades estudadas neste trabalho, somente a Resistência a Compressão Axial é constantemente medida no canteiro de obras. Sendo assim, torna-se evidente a importância do conhecimento desta propriedade e sua correlação com as demais.

A NBR 6118: 2014 apresenta uma equação para estimativa da Resistência à Compressão Axial do concreto ao longo do tempo. O valor da resistência é obtida pela Equação 04.

Equação 04

$$f_{cj} = \exp\left\{s \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}$$

Onde:

f_{cj} = Resistência à Compressão do concreto na idade de t dias;

t = Idade do concreto em dias;

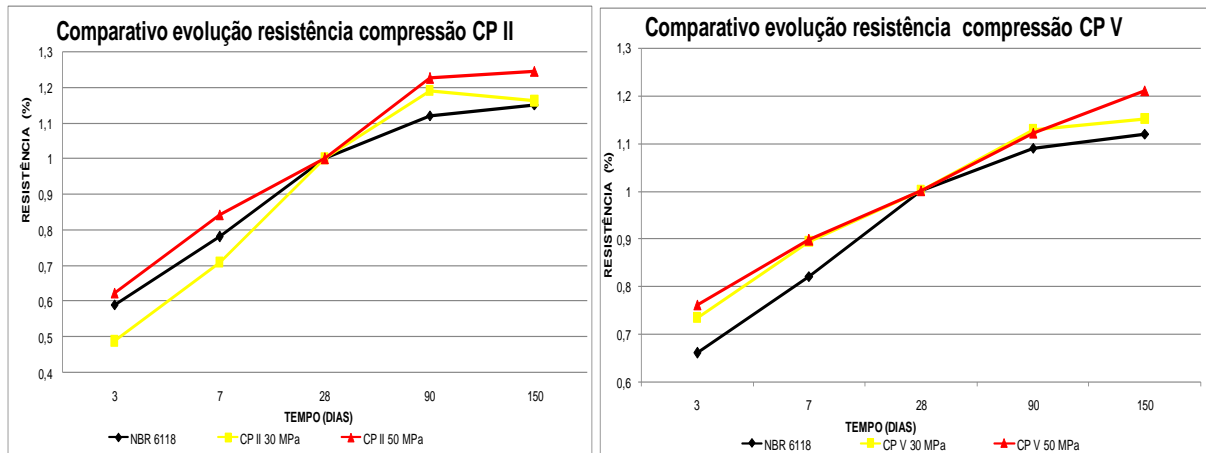
s = Coeficiente de crescimento da resistência em função do tipo de cimento:

$s = 0,25$ para cimento CP I e CP II;

$s = 0,20$ para cimento CP V ARI.

A Figura 07 apresenta o comparativo da evolução à Resistência a Compressão Axial para os cimentos estudados CP II e CP V ARI respectivamente, para a resistência de 30 e 50 MPa e o estimado pela NBR 6118:2014

Figura 07: Comparativo da evolução da Resistência à Compressão Axial do cimento CP II e CP V.



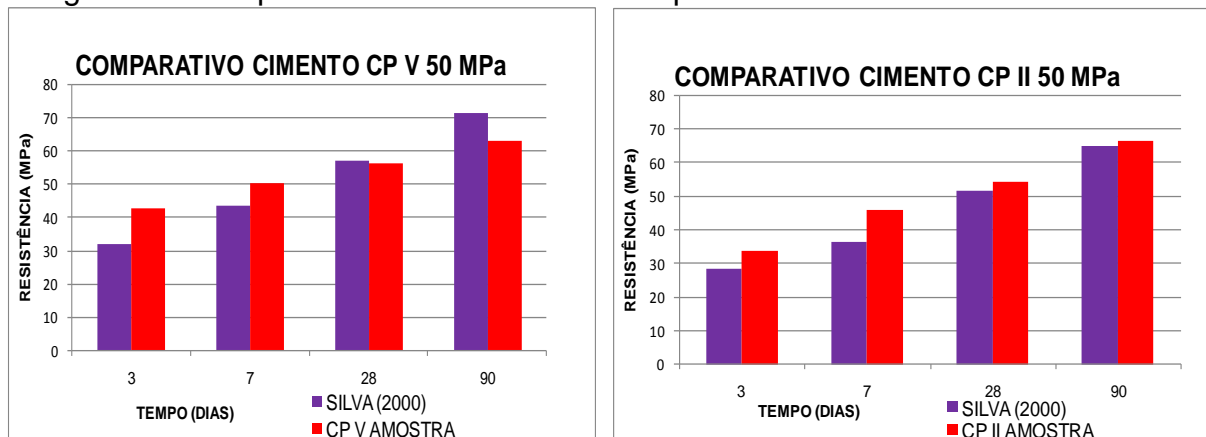
Fonte: O Autor, 2017.

O concreto com cimento CP II 50 MPa apresentou resultados superiores aos valores estimado pela equação da norma NBR 6118:2014 em todas as idades. Porém o cimento CP II 30 MPa obteve valores inferiores aos calculados pela norma nas idades de 03 e 07 dias e superiores nas idades de 90 e 150 dias.

Os valores encontrados para o cimento CP V na resistência de 30 e 50 MPa se mantiveram superiores aos valores estimados pela NBR 6118:2014 em todas as idades.

O presente estudo buscou outro trabalho técnico com o objetivo de comparar e analisar os resultados. Segundo Silva (2000), foram elaborados dois gráficos com o comparativo dos dois tipos de cimentos CP II e CP V para as resistências de 50 MPa, conforme ilustra a Figura 08.

Figura 08: Comparativo da resistência à compressão com estudo de outro autor.



Fonte: O Autor, 2017.

No comparativo utilizando o cimento CP V ARI, observou-se um comportamento diferente das resistências nas idades iniciais e finais. Aos 03 e 07 dias, as resistências ficaram superiores ao do trabalho de tese analisado, porém aos 90 dias de idade a resistência do trabalho relacionado foi superior em 8,50 MPa e atingiu 26% de aumento em relação a idade parâmetro de 28 dias.

No comparativo utilizando o cimento CP II, os resultados foram próximos, entretanto foi analisado em percentual no estudo de tese o crescimento da resistência do concreto na idade de 28 para 90 dias, e segundo o calculo o aumento foi de 28 %.

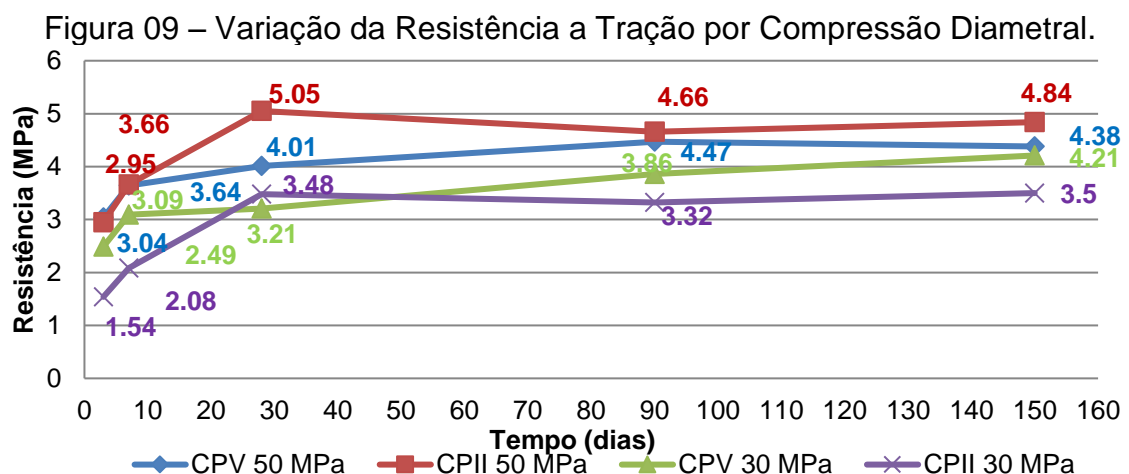
3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Resistência à Compressão Axial do concreto é a propriedade considerada no dimensionamento estrutural, mas, para alguns fins a Resistência a Tração por Compressão Diametral, pode ser objetivo de interesse. Exemplos disso são os projetos de pisos rodoviários e de pistas de pouso, e dimensionamento ao cisalhamento e resistência a fissuração. (NEVILLE 2016). A Tabela 04 apresenta a média dos resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, sendo expressos também na Figura 09 em forma de gráfico.

Tabela 04 – Resistência à Tração por Compressão Diametral

| Tempo (dias) | CPV 30 MPA | Desvio Padrão | CPV 50 MPA | Desvio Padrão | CPII 30 MPA | Desvio Padrão | CPII 50 MPA | Desvio Padrão |
|--------------|------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 3 | 2,49 | 0,99 | 3,04 | 1,45 | 1,54 | 0,67 | 2,95 | 0,87 |
| 7 | 3,09 | 3,09 | 3,64 | 0,32 | 2,08 | 1,63 | 3,66 | 2,63 |
| 28 | 3,21 | 1,69 | 4,01 | 1,90 | 3,48 | 0,85 | 5,05 | 1,21 |
| 90 | 3,86 | 0,91 | 4,47 | 1,35 | 3,32 | 0,64 | 4,66 | 4,31 |
| 150 | 4,21 | 2,64 | 4,38 | 2,61 | 3,50 | 1,30 | 4,84 | 1,68 |

Fonte: O Autor, 2017.



Fonte: O Autor, 2017.

Após analisar os resultados e executar a análise de variância (ANOVA) foi verificado que existe diferença significativa para as resistências de 50 MPa, na idade de 28 dias. Aos 03, 07, 90 e 150 dias os resultados não apresentaram diferença estatística significativa. Analisando a Tabela 04 comprovou-se que até os 28 dias, a Resistência a Tração por Compressão Diametral desenvolveu-se de forma progressiva, porém diferentemente da Resistência a Compressão Axial a partir dos 28 dias, sua resistência não varia uniformemente.

O concreto utilizando cimento CP V continuou a aumentar sua resistência após a idade de 28 dias, comprovando que os comportamentos dos dois tipos de cimentos são diferentes ao longo do tempo.

A Resistência a Compressão Axial e a Resistência à Tração por Compressão Diametral podem ser relacionadas, porém não existe uma proporcionalidade direta. À medida que a Resistência a Compressão Axial do concreto aumenta, a Resistência à Tração por Compressão Diametral também aumenta, mas a uma taxa decrescente (MEHTA, MONTEIRO, 2008).

3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O conhecimento do Módulo de Elasticidade é importante para um projeto quando é necessário calcular as deformações de diferentes elementos estruturais que compõem uma estrutura.

De acordo com METHA e MONTEIRO (2008), a porosidade é uma das características que mais afetam o módulo de deformação do concreto. Quanto menor a porosidade e o valor da relação água/cimento, o valor do módulo tende a ser maior. A Tabela 05 ilustra a média dos resultados de módulo obtidos no presente trabalho.

Tabela 05 – Resultados Módulo de Elasticidade

| Tempo (dias) | CPV 30 MPA | Desvio Padrão | CPV 50 MPA | Desvio Padrão | CPII 30 MPA | Desvio Padrão | CPII 50 MPA | Desvio Padrão |
|--------------|------------|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| 3 | 37,03 | 1,68 | 40,13 | 1,17 | 28,63 | 0,72 | 34,11 | 1,57 |
| 7 | 41,9 | 1,74 | 42,23 | 1,32 | 35,95 | 1,17 | 37,86 | 1,51 |
| 28 | 42,29 | 1,70 | 42,32 | 1,09 | 36,29 | 0,26 | 42,37 | 0,90 |
| 90 | 40,22 | 0,95 | 42,55 | 2,55 | 37,42 | 1,55 | 43,86 | 3,35 |
| 150 | 40,69 | 2,28 | 43,83 | 1,57 | 36,38 | 1,13 | 44,25 | 2,38 |

Fonte: O Autor, 2017.

As dosagem para resistência de 50 MPa por ter uma relação água/cimento menor que as dosagens de 30 MPa, apresentaram um aumento do módulo superior após o período de 28 dias. Segundo (NEVILLE), isso é devido aos grãos de cimentos estarem mais próximos entre si, estabelecendo mais rapidamente um sistema contínuo de gel.

Fazendo a análise da Tabela 05, constatou-se que as quatro referências usadas apresentaram resultados de acordo com as expectativas até os 28 dias, porém o efeito do Módulo de Elasticidade a partir dos 28 dias de idade, não apresentou variação significativa.

Segundo NEVILLE (1982), o Módulo de Elasticidade do concreto é geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos agregados.

O Módulo de Elasticidade pode ser estimado a partir da Resistência a Compressão Axial, utilizando a Equação 05 e Equação 06 estabelecida pela NBR 6118:2014

Equação 05

$$E_{ci} = \alpha E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \quad \text{para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;}$$

Equação 06

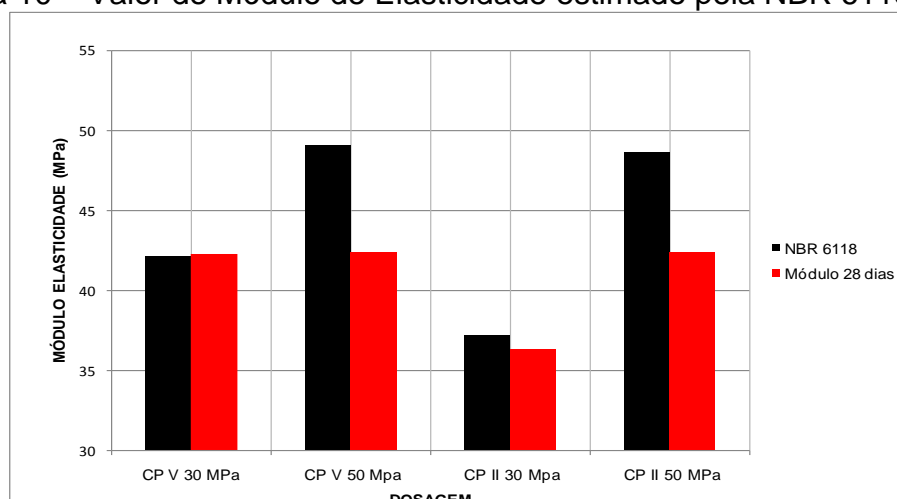
$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa.}$$

Sendo,

$\alpha E = 1,2$ para basalto e diabásio;

A Figura 10 apresenta os resultados estimados pela NBR 6118, e os resultados do Módulo de Elasticidade aos 28 dias.

Figura 10 – Valor de Módulo de Elasticidade estimado pela NBR 6118:2014.



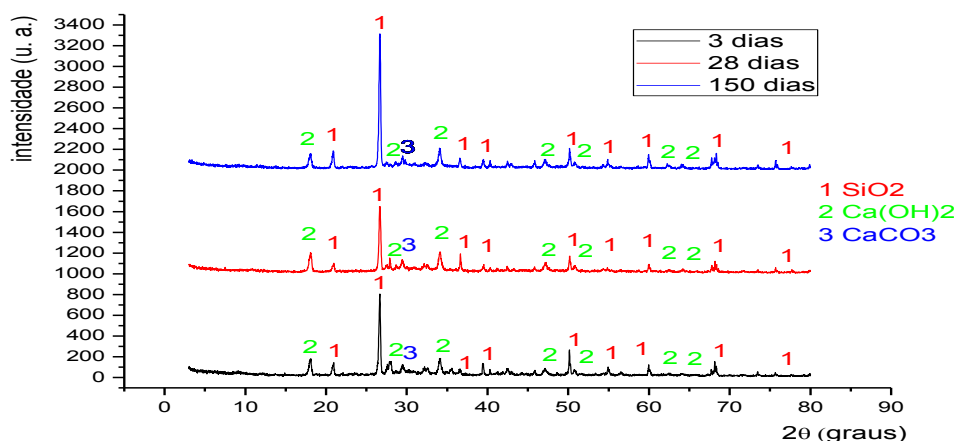
Fonte: O Autor, 2017.

De acordo com o comparativo da Figura 10, observou-se que para as amostras com cimento CP V e CP II com resistências de 30 MPa, os valores encontrados pela NBR 6118:2014 apresentaram precisão nos resultados. Já no comparativo das resistências de 50 MPa, os resultados obtidos pela norma ficaram superestimados.

3.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

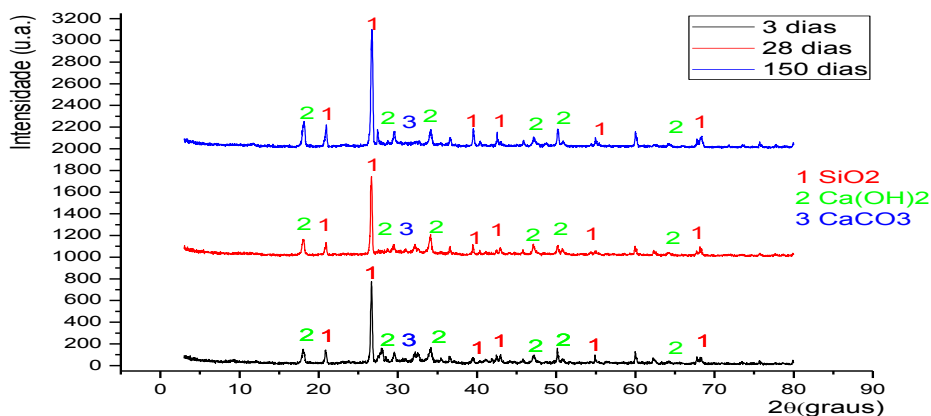
O que define as propriedades dos materiais cimentícios são os seus compostos minerais e suas proporções presentes. Com o ensaio de Difração por Raios-X (DRX) foi possível identificar as fases cristalinas presentes nos compostos mineirais. As Figuras 11 e 12 apresentam os resultados obtidos no ensaio de Difração de Raios-X utilizando o cimento CP V e CP II respectivamente.

Figura 11 - Difração de Raios-X (DRX) da amostra CP V 50 MPa



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 12 - Difração de Raios-X (DRX) da amostra CP II 50 MPa



Fonte: O Autor, 2017.

Os elementos detectados nas amostras pela técnica de DRX foram o Quartzo (SiO_2), Portlandita [Ca(OH)_2] e Calcita (CaCO_3).

O Quartzo (SiO_2) é uma das matérias primas utilizadas na fabricação do clínquer.

O hidróxido de cálcio - CH (portlandita) foi detectado por DRX em todas as análises. Os cristais de hidróxido de cálcio constituem 20 a 25% do volume dos sólidos na pasta de cimento hidratada e a potencial contribuição a resistência do hidróxido de cálcio é limitada devido à área superficial consideravelmente mais baixa. (METHA, MONTEIRO, 2008).

Os mesmos elementos encontrados no cimento CP V foram identificados no cimento CP II, nas quatro dosagens estabelecidas.

Segundo KUROTUSCH (2010), com o aumento no consumo de cimento cresce a quantidade de poros preenchidos com cristais. A quantidade de cimento na mistura afeta a quantidade total de calor produzida na hidratação do cimento, portanto as proporções da mistura podem ser variadas no intuito de ajudar o controle da liberação de calor.

A cura do concreto é o conjunto de medidas que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação. A finalidade da cura é manter o concreto saturado, para que os espaços inicialmente ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação. A cura adequada é fundamental para que o concreto alcance melhor desempenho, resultando em uma redução de sua porosidade, contribuindo para aumentar a resistência e durabilidade das estruturas (BARDELLA, 2005).

4. CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos dos ensaios foi possível concluir que:

- Comprovou-se o crescimento da resistência do concreto ao longo do tempo, com maior intensidade no cimento CP II e para as resistências de 50 MPa, por ter um maior consumo de cimento e menor relação água/cimento.
- A tendência geral dos cimentos que possuem uma velocidade menor de endurecimento é ter uma resistência final maior. No comparativo entre os dois tipos de cimentos a Resistência à Compressão Axial aos 90 dias do cimento CP II foi

superior em aproximadamente 7 % em relação ao cimento CP V para a resistência de 30 MPa, e superior em 10 % para a resistência de 50 MPa.

- Nas primeiras idades de hidratação verificou-se diferença significativa nas propriedades mecânicas. A resistência atingida pelo cimento de alta resistência inicial em três dias foi da mesma ordem de grandeza do cimento portland CP II aos sete dias.
- A realização do ensaio de Difração de Raios-X (DRX) possibilitou a identificação dos produtos formados Quartzo, Portlandita e Calcita, detectados nas idades de 03, 28 e 150 dias. Observou-se a evolução da hidratação para todas as amostras pelos picos gerados pelo difratograma.

5. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo, desenvolvendo equações de correlações.
- Estudo das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo utilizando agregados reciclados e desenvolvendo equações de correlações.

6. REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo Serra, PINI, 1.ed. p. 667. São Paulo 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

_____**NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

_____**NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático e de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

_____**NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2011.

_____**NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____ **NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

BARDELLA, P. S. 1º Encontro nacional de pesquisa projeto produção em concreto pré- moldado. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de AltoForno com Utilização de Sílica Ativa.** São Carlos – SP, nov. 2005.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado:** segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlo, SP: EDUFSCAR, 2014.

ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005

KUROTUSCH, S.M. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** 2010. 242f. Tese (Mestrado) - Universidade federal de Goiás, Jataí, 2010.

MEHTA K. P.; MONTEIRO Paulo J. M. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo . IBRACON, 2008. 674 p.

_____ **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

_____ **Propriedades do concreto.** 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 523 p.

SILVA, I.J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 2000. 279f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.